

■ 論 文 ■

단속류 퍼지 통행시간 추정기의 개발

Development of Fuzzy Travel Time Estimator for Interrupted Traffic Flow

오 기 도

(SK C&C(주) 공공ITS사업추진팀)

김 영 찬

(서울시립대학교 도시공학과 부교수)

목 차

- | | |
|----------------------|------------------------------|
| I. 서론 | 1. 교통량과 점유율을 이용한 통행속도 추정 모형 |
| II. 기존 연구의 검토 및 현황 | 2. 점유율과 지점속도를 이용한 통행시간 추정 모형 |
| 1. 평균 차량 길이법 | 3. 각 추정 기법의 비교 평가 |
| 2. VPLUSKO 방법 | IV. 결론 |
| 3. ADVANCE의 적용 알고리즘 | 참고문헌 |
| 4. 퍼지이론을 이용한 통행속도 추정 | |
| III. 통행시간 추정기의 개발 | |

Key Words : 통행시간, 퍼지제어, 검지기, 통행속도, 단속류

요 약

본 논문에서는 추종 모형을 이용한 미시 교통류 시뮬레이션 모형(DETSIM)과 현장 조사 자료를 이용하여 단속류에서 링크의 통행시간을 추정하는 2개의 모형을 개발하였다. 2개의 모형은 통행시간과 교통변수가 가지는 비선형성에 적합하도록 퍼지논리 제어를 이용하고 있다.

시뮬레이션의 수행결과와 현장 조사에 의하면 검지기로부터 발생하는 교통량, 점유율, 속도 자료중 링크의 통행시간을 가장 잘 반영하는 것은 점유율이며, 지점속도와 교통량은 부분적으로 통행시간에 대한 설명력을 가진다. 그러나, 통행시간을 추정하는데 적용되는 교통량, 점유율 및 지점속도는 동일한 교통상황에 대해서도 검지기의 위치에 따라 다른 값을 가지게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위한 2개의 통행시간 추정 모형을 개발하였으며, 이것은 교통량과 점유율을 이용하여 통행시간을 추정하는 모형(FETSVO)과 검지기로부터 발생하는 점유율과 지점속도를 이용하여 통행속도를 추정하는 모형(FETTOS)으로 구분된다. FETSVO모형은 이식성이 뛰어나며, FETTOS 모형은 신호주기와 녹색신호시간비 등의 자료가 요구되나, 통행시간을 직접추정하고 통행시간에 민감한 자료에 의하기 때문에 FETSVO모형보다 우수한 것으로 나타났다.

I. 서론

교통정보에 대한 사회적 수요가 증가함에 따라 공공 및 민간에서 교통정보를 제공하고자 하는 교통정보센터(Traffic Information Center)가 구축중이거나 운영되고 있다. 교통정보는 일반적인 경로 안내, 돌발상황, 도로 공사, 통행시간 정보 등 그 형태와 종류가 다양하다. 이 중, 통행시간 정보는 도로상에서 발생하는 모든 형태의 교통상황을 종합적으로 반영하며, 운전자가 최적의 노선을 선택하는데 가장 중요한 자료가 된다.

이러한 단속류의 링크 통행시간은 대기행렬의 발생, 교통류의 주기적 단절 현상 및 과포화 상태의 발생 등으로 인하여 정확한 링크 통행시간을 추정하는 것이 어려워, 더욱이 새로운 통행시간 추정 기법에 제시되더라도 링크에 존재하는 검지기의 위치가 링크마다 다르기 때문에 적용성과 정확도에 문제점이 있다.

따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위해 요구되는 통행시간 추정 모형은 서로 다른 검지기의 위치와 검지자료의 불확실성에 대해 적용성이 뛰어난 모형이어야 하며, 기존 모형에서 한계를 보여왔던 과포화 상태의 링크에 대해서도 정확한 추정력을 가져야 한다. 또, 다양한 형태의 링크에 대한 이식성이 존재하여야 한다.

본 연구에서는 추종이론(car-following model)을 적용한 미시 교통류 시뮬레이션 모형(Detector Simulation, DETSIM)과 현장 조사자료를 이용하여 검지기의 위치에 따른 다양한 자료의 속성을 파악하며, 이를 통하여 2개의 통행시간 추정기(Fuzzy Estimator)를 제시하였다.

II. 기존 연구의 검토 및 현황

여기서는 기존 통행시간 및 통행속도 추정 기법으로 평균 차량 길이법, VPLUSKO 방법, ADVANCE의 Detector Travel Time Conversion Algorithm과 퍼지제어모형을 이용한 기존 방법을 고찰하였다.

1. 평균 차량 길이법

계산이 용이하며, 전통적인 교통공학 이론을 근거로 한 것으로서 지금까지 가장 많이 사용되는 속도 추정 방법이다. 계산식에 포함된 평균차량길이값에 해당하

는 계수(calibration factor)를 조정함으로써 통행속도 추정에 사용되어질 수 있다. 이 방법을 정확히 적용하기 위해서는 검지기 상을 통과하는 모든 차량 길이의 평균값을 알아야 하지만, 현실적으로 불가능하기 때문에 경험적으로 얻어지는 계수를 이용하여 통행속도를 산출한다.¹⁾

$$SMS = C \frac{Vol}{\%Occ} \quad (1)$$

여기서, C는 차량길이와 검지영역의 길이의 합이며, %Occ와 Vol은 각각 점유율(percent occupancy)과 교통량이다.

2. VPLUSKO 방법

VPLUSKO는 일반적으로 교통량과 점유율의 비선형 관계를 선형으로 표현하여 혼잡정도를 나타내기 위한 값으로 사용된다. 김영찬 등²⁾에 의한 이 방법은 VPLUSKO와 통행속도의 관계가 역수의 관계를 가지고 있음을 밝혀내고 이러한 관계를 다음과 같이 제시하였다. 즉,

$$SMS \propto \frac{1}{VPLUSKO_i} \quad (2)$$

VPLUSKO는 $Vol + K \cdot \%Occ$ 로 구해지며, 일반적인 K값은 20이다. 이 방법에서 구해진 α 를 각 시간간격의 VPLUSKO의 역수에 곱하여 통행속도를 얻을 수 있다.

$$SMS = \frac{\alpha}{VPLUSKO_i} \quad (3)$$

이 방법은 추정하고자 하는 링크의 일평균통행속도(average daily travel speed)에 대한 정보가 있는 경우 추정력이 높아지며, VPLUSKO의 역수와 일평균 통행속도값을 이용한 α 값을 이용하여 통행속도를 추정한다. 계수 α 를 구하는 방법은 다음 수식과 같다.

$$\alpha = \frac{\text{Average Daily Travel Speed}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (VPLUSKO)^{-1}} \quad (4)$$

통행속도에 대한 추정력은 다소 떨어지나, 계산 및 적용이 용이하며, 계산된 통행속도가 교통상태의 변화 형태를 잘 반영하는 장점이 있다.

3. ADVANCE의 적용 알고리즘

미국 시카고 주의 ADVANCE(Advanced Driver and Vehicle Advisory Navigation Concept)에서는 검지기 자료에 의한 통행시간 추정에 선형회귀분석을 이용한다. 이 방법은 검지기 자료를 통행시간(t_d)으로 전환하는 알고리즘으로서, 어떤 도로구간의 모든 이용가능한 검지기 자료로부터의 평균 점유율(O_d)을 그 구간의 모든 링크에 공통된 통행시간으로 전환한다. 시간간격으로 나누어진 검지기 점유율(O)의 범위는 $O_{t,1}$ 과 $O_{t,2}$ 에 의해 정의된다.³⁾

- Case 1 : 점유율이 $O_{t,1}$ 보다 작으면, $t_d = h_{11} + h_{12} \cdot O_d$
- Case 2 : 점유율이 $O_{t,1}$ 와 $O_{t,2}$ 사이에 있으면, $t_d = h_{21} + h_{22} \cdot O_d$
- Case 3 : 점유율이 $O_{t,2}$ 보다 크면, $t_d = h_{31}$
- Case 4 : 통행시간은 $t_d < t_{min}$ 이면, $t_d = t_{min}$ 으로 정하고, ($t_{min} = l/v_{max}$), $t_d > t_{max}$ 이면, $t_d = t_{max}$ ($t_{max} = l/v_{min}$)

여기서, $O_{t,1}$ = 27% occupancy level, $O_{t,2}$ = 42% occupancy level, l = 구간길이(m), v_{max} and v_{min} = 통행속도의 상하한값(각각 35m/sec, 1m/sec), t_{max} and t_{min} = 링크 통행시간의 상하한값, O_d = 어떤 도로구간에서 이용가능한 모든 검지기에 대한 평균 점유율, h_{ij} = conversion parameter values이다.

이 방법은 다양한 수집원에 의한 개별적인 링크에 대해 경험적인 선형식을 이용하여 통행시간을 추정하는 방식으로서, 구간마다 다른 계수 때문에 다른 링크에 대한 이식성이 전혀 없으며 선형식에서 제약하는 최대 통행시간값이 120초 정도로서 국내의 혼잡한 도로여건을 감안할 때, 통행시간을 추정하는 방법으로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

4. 퍼지이론을 이용한 통행속도 추정

퍼지 논리(fuzzy logic)에 의해 통행시간을 추정하려는 시도는 Sisiopiku et al¹⁾에 의해 최초로 수행

되었다. 이 연구에서는 교통량과 점유율에 대해 각각 퍼지 규칙을 적용하여 퍼지 논리에 의해 통행시간 추정이 가능함을 보였다. 이 연구에서는 교통량과 점유율을 독립적으로 분리하였으며, 고안된 퍼지논리에 대한 통행시간으로의 연산방법 등이 구체적으로 제시하지 못하였다.

김도경(1998)의 연구에서는 VPLUSKO를 이용한 추정, 인공신경망(artificial neural network)을 이용한 추정 및 퍼지제어기(fuzzy logic controller)를 이용한 통행속도 추정기법을 평가하고 퍼지제어기가 링크의 통행속도를 추정하는데 적합하고 상대적으로 우수한 이식성(transferability)을 가진다고 제시하였다. 이 연구에서 제시한 퍼지제어기는 검지기로부터 발생하는 교통량과 점유율을 이용하여 통행속도를 추정하였으며, 통행속도에 영향을 주는 검지기의 위치, 신호시간 및 링크 특성 등에 대한 고려가 수행되지 않았다. 이 연구에서는 교통량과 점유율을 동시에 고려하여 퍼지제어 모형을 구성하였으나, 퍼지제어기에서 가장 핵심적인 부분인 퍼지집합의 설정방법과 퍼지규칙의 작성에 대하여 경우에 따라 다른 퍼지집합과 퍼지규칙을 적용함으로써 실제로 적용할 수 없다는 단점을 가진다.

III. 통행시간 추정기의 개발

본 절에서는 2개의 통행시간 추정기(FETSVO와 FETTOS)를 소개한다. 2개의 추정 모형은 C언어로 구현된 퍼지논리제어기를 사용하고 있으므로, 퍼지추론 과정은 동일하다. 그러나, 퍼지집합 및 퍼지규칙 설정 방법 등은 모형의 출력과 변수가 다르기 때문에 상이하며, 다음 절에서 상세히 다룬다.

1. 교통량과 점유율을 이용한 통행속도 추정 모형

김도경(1998)의 연구에서 제시한 퍼지 집합의 수와 임출력 변수를 그대로 유지하였다. 본 모형은 단일 퍼지 규칙에 의해서, 모든 경우의 검지기 자료 자체에 의한 퍼지집합을 결정하는 방법을 제시함으로써 모형의 현실 적용성을 높인 것이다. 이 모형의 적용 시에는 검지자료인 교통량과 점유율만 있으면 퍼지집합을 설정할 수 있으며, 필요시 매우 간단히 조정될 수 있는 장점을 가진다. 본 모형을 간단히 식별하기

위해 FETSVO(Fuzzy Estimator of Travel Speed using Volume and Occupancy)라고 한다.

1) 퍼지 규칙(Fuzzy Rules)

퍼지 규칙과 퍼지 집합은 퍼지 제어기의 출력값에 대해 상호 의존적이고 보완적이다. 퍼지 규칙을 설계하기 위해서는 입력과 출력값에 대한 퍼지 집합의 개수를 결정하여야 한다. 통행속도에 대해 그다지 민감하지 않은 교통량은 5개, 통행속도에 대한 설명력이 높은 점유율은 7개로 결정하였으며, 이에 따라 발생할 수 있는 최대 퍼지 규칙의 수는 35개이다. 본 모형의 퍼지 규칙은 이식성을 최대한 고려하며 작성하였기 때문에 35개의 퍼지 규칙을 모두 사용하며, 퍼지 규칙의 결론부에 해당하는 통행속도의 퍼지 집합은 5개로 구성된다. 작성된 최종적인 퍼지 규칙은 <표 1>과 같다.

퍼지 규칙의 작성은 전문가의 지식에 의존하는 것이 일반적이며, 이에 대한 특이할만한 방법은 제시되지 않고 있다.⁶⁾ 본 모형에서 반영된 전문가의 지식이란 교통류의 기본적인 특징을 말한다. 즉, 교통량 또는 점유율이 작으면 통행속도가 높을 것이며, 그 반대인 경우는 통행속도가 낮을 것이 자명하다. 그러나, 이러한 극단적인 경우를 제외하면 전문가조차도 통행속도의 정도를 제시하기 어려우며 이와 같은 검지변수와 통행속도와의 불확실성을 설명하기 위한 것이 퍼지 규칙이다. <표 1>에 작성된 퍼지규칙은 현장조사결과와 수십차례의 시뮬레이션에 의해 결정되었다. 모형의 적용시에 실제로 발생하기 어려운 퍼지 규칙들은 교통류 상태와는 관계없이 발생할 수 있는 검지자료의 불안정성을 다룰 수 있도록 고안되었으며, 교통량과 점유율 중 점유율이 통행속도에 대하여 가장 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타남에 따라 점유율에 의한 매핑이 주도적으로 이루어질 수 있도록 작성되었다.

퍼지 규칙에서 각 언어변수(linguistic variable)의 용어(term)는 다음과 같다. 점유율의 VL, L, BA, A, AA, H, VH는 각각, Very Low, Low, Below Average, Average, Above Average, High, Very High이며, 교통량의 LC, MC, BC, NC, AC는 각각, Less Count, More Count, Below Capacity, Near Capacity, Above Capacity이다. 작성된 <표 1>은 다음과 같이 퍼지 규칙으로 해석된다. 첫 번째 열의 첫 번째 행의 예이다.

*IF Volume is LC AND Occupancy is VL,
THEN Travel Speed is VH.*

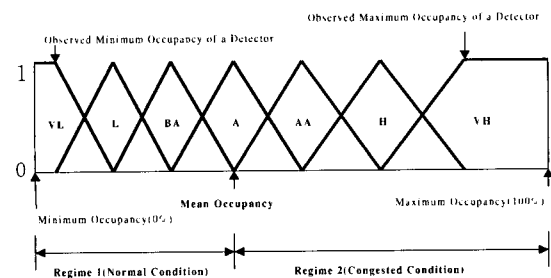
2) 퍼지 집합(Fuzzy Sets)

일반적인 퍼지 제어 시스템에서 퍼지 집합을 최종적으로 결정하는 것이 가장 어려운 과정이며, 이러한 어려움은 퍼지 제어기의 단점이기도 하다. 그러나, 일반적으로 통행속도 추정 모형들은 입력자료에 따른 출력의 참값(관측된 통행속도)을 현실적으로 흔히 구할 수 없다. 그러므로, 수집된 검지자료에 의하여 검지기의 위치, 검지자료의 잡음 등을 고려할 수 있도록 퍼지 집합을 검지기 자료 자체에 의해 설정하는 방법을 <그림 1>과 같이 고안하였다.

퍼지 집합을 <그림 1>과 같이 결정한 것은 기본적으로 점유율과 통행속도가 가지는 비선형성과 검지기의 상이한 위치를 퍼지논리에 반영하기 위한 것이며, 모든 퍼지 집합의 결정은 <그림 1>과 같이 어떤 검지기로부터 장기간(1일 이상) 관측된 점유율의 최소 및 최대값과 관측된 점유율의 평균값에 의해 모두 결정될 수 있다. 각각의 퍼지 집합의 결정은 각 영역(regime)에서 선형 균등 분할하며, 교통량에 대한 퍼지 집합의 경우도 동일하게 적용된다. 이러한 퍼지 집합 설

<표 1> FETSVO 모형의 퍼지 규칙

vol \ occ	VL	L	BA	A	AA	H	VH
LC	VH	H	H	M	M	VS	VS
MC	H	H	M	M	M	S	VS
BC	H	M	M	M	M	S	VS
NC	M	M	S	S	S	S	VS
AC	M	M	S	S	VS	VS	VS



<그림 1> 제안된 퍼지집합의 형태

정 방식은 현장조사와 시뮬레이션의 결과를 참고하여 점유율과 통행속도가 가지는 2개의 영역의 경계가 대략적으로 평균 점유율값 근처에 위치한다는 사실에 의해 고안되었다.

3) 퍼지 집합의 조정(tuning)

통행속도 추정에 미치는 교통량의 설명력은 한산한 상태에서 정상적인 상태까지 추정의 정확성에 영향을 많이 미치도록 조정하며, 점유율의 설명력은 정상적인 상태에서 혼잡한 상태까지의 추정에 정확성에 영향을 많이 미치도록 조정한다. 이와 같이 조정하는 이유는 교통량이 가지는 통행속도에 대한 설명력이 원활한 교통류에 적합하다는 것을 의미한다.

통행속도의 퍼지 집합은 퍼지 규칙의 결론부(consequent)에서 출력되는 통행속도의 범위를 결정하기 때문에 가장 중요한 퍼지 집합이다. 따라서, 통행속도의 최소값 및 최대값을 정의하고, 이에 따라 5개의 퍼지 집합으로 구분하여야 한다. 최소값으로 0kph의 통행속도가 발생할 가능성은 거의 없으므로 본 모형에서는 현장조사와 경험적인 판단에 근거하여 최소값을 3kph로 결정하였으며, 최대값은 신호의 연동정도, 제한속도, 차선수 및 기타 교통조건에 따라서 다양하게 설정될 수 있으나, 그 값의 범위는 40~60kph라고 판단된다. 통행속도의 최대값을 결정하는 몇 가지 방법을 제시하면 다음과 같다.

- 검지기로부터 생성되는 지점속도의 최대값 이용
- 해당 링크의 법정제한속도를 이용
- 도로용량판람에서 제시하고 있는 간선도로의 순행속도 결정 방식을 따라 통행속도의 최대값을 결정 : 링크의 길이와 차로수의 함수
- 해당 가로의 연동속도(최적화 수행시 설정속도)를 이용

통행속도의 최대값을 60kph라고 할 경우의 통행속도의 퍼지 집합은 <표 2>와 같다. <표 2>에서 'VH'의 우측값은 퍼지추론의 계산과정상에서 매핑된 통행속도값이 충분히 설정한 최대속도로 산출되기 위한 계산을 위한 설정값(computational value)이다.

<표 2>에서 언어변수 값(term) VH, H, M, L, VL은 각각, Very High, High, Medium, Low, Very Low이며, 각 값들은 삼각함수의 형태를 결정하는 3개의 값이다.

<표 2> 통행속도의 퍼지 집합

통행속도의 언어값	좌측값	기준값	우측값
VL	3	6	15
L	6	15	30
M	15	30	40
H	30	50	60
VH	50	60	100

본 모형에서는 입력변수(교통량과 점유율)의 전체 퍼지 집합을 결정하는데 3개의 값(최대값, 최소값, 평균)만 사용되기 때문에 퍼지 집합을 이해하는 것이 용이하며, 출력값을 개선하기 위한 퍼지 집합의 조정에서는 평균값만을 조정함으로써 퍼지 집합의 조정작업이 용이하도록 하였다.

4) 추론(Inference)

본 모형에서 사용하는 추론 엔진(inference engine)은 Zedah의 MIN과 MAX연산에 의해서 이루어지며, 기본적으로 Mamdani의 추론과정을 이용한다. 추론법에는 무한치논리를 기반으로 하는 추론법과 퍼지논리를 기반으로 하는 추론법이 있으며, 무한치논리를 기반으로 하는 추론법은 합성에 의한 방법, Tsukamoto의 방법, Takagi와 Sugeno의 방법으로 분류할 수 있다. 이중 합성에 의한 추론법에는 Zadeh의 방법, Mamdani의 방법, Larsen의 방법 등 40여 가지가 있다. 이중 Mamdani의 추론 방법은 인간의 추론과 비교적 가까운 결과를 나타내며, 계산과정이 비교적 간단하여 퍼지제어기에 자주 사용된다.⁷⁾ 본 연구에서는 여러 근사추론중 본 연구에서 작성된 퍼지규칙의 적용 가능성, 현실적으로 적용되기 위한 계산의 용이성, 계산결과의 직관성, 출력결과(비퍼지화)의 합리성 등을 고려하여 Mamdani의 추론법을 사용하였다. 여기서 비퍼지화(fuzzifier)는 삼각함수, 비퍼지화기(defuzzifier)로는 COA(Center of Area)방법을 사용하며, 식(5)와 같이 계산된다.⁶⁾

$$z^*_{COA} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j)z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j)} \tag{5}$$

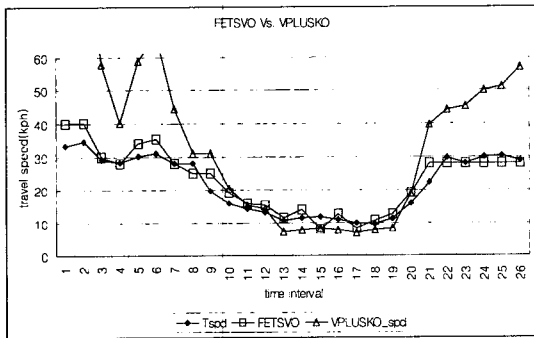
여기서, z^*_{COA} 는 비퍼지화의 결과로 산출되는 통행속도이며, z_j 는 양자화 수준 j에서 출력되는 통행속도의 양이며, $\mu_C(z_j)$ 는 퍼지 집합 C에서 소속정도를

나타낸다. n은 출력의 양자화 수이다. 퍼지제어기는 인공지능 기법중에서 가장 논리적인 설명력이 있는 분야이나 아직까지도 이 비퍼지화기에 대한 부분은 잘 설명되지 않고 있다. 비퍼지화기의 종류는 다양하나, 본 모형과 같이 추론에 의한 연산이 강조되는 경우에는 COA를 이용하여 매핑된 퍼지 집합으로부터의 설명력이 동시에 반영된 결과를 도출하는 것이 적합하다고 판단된다.

5) 적용 결과

본 모형의 평가를 위해서 DETSIM에 의해 60주 기동안 시뮬레이션을 수행한 후, 시뮬레이션으로부터 산출된 통행시간을 FETSVO를 이용하여 추정하였다. 시뮬레이션에 사용된 입력 교통량은 가급적 현실에 가까운 상황을 만들기 위해서 남부순환로에서 수집한 검지기 자료를 이용하였다. 모형의 평가는 녹색신호시간 비가 0.4이고, 링크의 길이가 700m인 경우에 대해서 신호주기가 100초, 130초와 160초에 대해서 적용하였다. 검지자료의 수집은 5분 시간간격으로 이루어졌다.

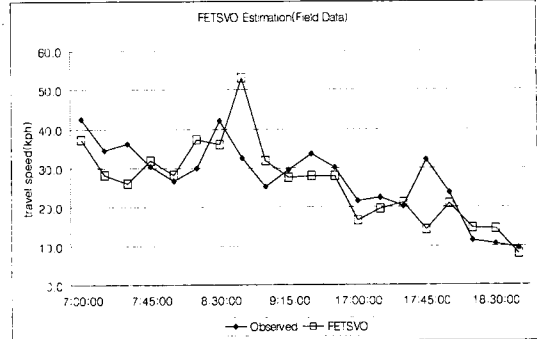
〈그림 2〉은 검지기가 200m에 위치한 경우, 신호주기 130초에 대한 추정 결과이다. 여기서는 VPLUSKO 방법과 비교하였다. VPLUSKO 방법은 한산한 교통상태에서 통행속도를 과대예측하며, FETSVO는 모든 경우에서 VPLUSKO 보다 우수한 추정을 보인다. 다음 〈표 3〉은 두 방법에 의한 추정 결과를 비교한 것이다.



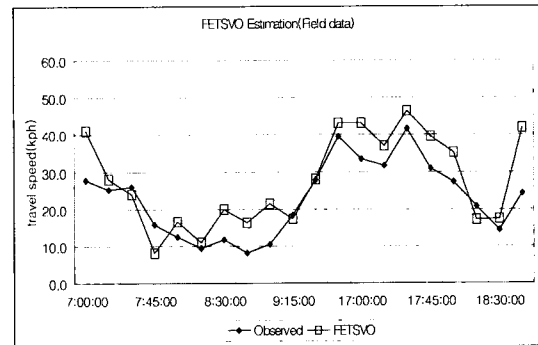
〈그림 2〉 통행속도 추정 결과(주기 130초, 검지기 200m)

〈표 3〉 FETSVO와 VPLUSKO의 비교(RMSE)

검지기 위치	200m		400m	
	FETSVO	VPLUSKO	FETSVO	VPLUSKO
신호주기				
100초	6.3	83.5	6.7	14.9
130초	8.1	38.7	3.1	24.3
160초	9.5	35.1	3.7	13.0



〈그림 3〉 남부순환로에 대한 통행속도 추정 결과(link12)



〈그림 4〉 남부순환로에 대한 통행속도 추정 결과(link87)

〈그림 3, 4〉는 모형의 이식성을 평가하기 위해 1998년 4월 28일 남부순환로에서 실시한 통행시간 조사 결과와 FETSVO모형의 추정 결과를 비교한 것이다.

남부순환로에 대한 적용 결과, RMSE는 모두 7.6 으로서 시뮬레이션 자료에 대한 추정 결과와 유사하며, 현장 적용에 대한 이식성 및 우수성을 입증한다. link12는 개포병원 사거리에서 현대체육관 사거리이며, link87은 숙명여고 사거리에서 현대체육관 사거리이다.

2. 점유율과 지점속도를 이용한 통행시간 추정 모형

본 모형은 기존의 퍼지제어모형이 교통량과 점유율을 사용하였기 때문에 발생하였던 문제점, 즉 혼잡할수록 교통량이 줄어드는 비선형성을 보완하기 위해 교통량을 입력변수로 하는 대신에 지점속도를 이용하였다.

이렇게 함으로써, 퍼지 규칙상의 모호함을 제거하였으며, 통행속도를 직접 추정하기 때문에 발생하였

던 부정확성을 극복할 수 있다. 즉, 낮은 통행속도를 통행시간으로 환산하였을 때, 통행속도의 절대적 차이보다 통행시간의 절대적 차이가 더욱 크다. 예를 들면, 10kph와 5kph의 통행속도는 5kph의 차이를 가지나 통행시간을 환산하였을 경우 링크의 길이에 따라 수십 초의 차이가 발생한다.

더욱이 최근에 설치되는 영상검지기(image processing detector)의 경우, 검지이론상 움직이는 물체의 속도를 직접계측함으로써 지점속도의 신뢰성이 기존의 루프 검지기보다 우수하기 때문에 검지 및 추정의 신뢰성을 높일 수 있다는 측면을 가진다.

점유율 및 지점속도는 링크의 검지기 위치에 따라서 상이한 값이 관측되며, 추정대상이 링크의 교통상태에 따라 민감한 통행시간이므로 여기서는 교통정보 수집용 검지기의 적정위치라고 판단되는 곳에서 통행시간을 추정하는 것을 기본가정으로 하였다. 여기서 적정 위치란 링크의 혼잡상황이 잘 감지될 수 있는 지역을 말하며, 신신호시스템과 본 연구의 시뮬레이션 결과에 의하면 링크의 길이에 따라 다소 차이가 있으나 정지선으로부터 200~300m가 적합한 것으로 분석되었다.

본 모형을 간단히 식별하기 위해 FETTOS(Fuzzy Estimator of Travel Time using Occupancy and Spot Speed)라고 한다.

1) 추정 변수

본 모형에서는 혼잡한 도로상황에 대해서는 상대적으로 둔감한 통행속도 대신에, 통행시간을 출력변수로 사용하며, 링크의 길이에 따르는 요인을 제거하기 위해서 링크 순행시간을 통행시간에서 제외한 지체(delay per vehicle)의 개념을 도입하였다.

본 모형은 통행시간과 비선형관계를 가지는 교통량을 입력 자료에서 제외시키고, 검지기로부터 발생하는 지점속도(spot speed)와 점유율을 입력 자료로 사용하고 있으며, 퍼지 추론에 의해 지체를 추정하고 순행시간을 더하여 통행시간을 직접 추정한다.

2) 퍼지 규칙(Fuzzy Rules)

본 모형에서는 시뮬레이션 결과를 통하여 지점속도와 점유율이 통행시간과 직접적인 선형관계를 가지는 사실을 알아내고, 이러한 관계를 기반으로 하여 퍼지

<표 4> FETTOS의 퍼지 규칙

occ \ sspd	VL	L	M	H	VH
VL	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
L	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
M	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
H	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
VH	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ

규칙을 작성하였다. 이와 같이 입력변수와 통행시간의 관계를 알아내기 위하여 수십차례의 시뮬레이션이 수행되었다.

점유율과 지점속도를 각각 5개의 퍼지 집합으로 나누고, 점유율과 통행시간 및 지점속도와 통행시간이 가지는 관계를 이용하여 퍼지 규칙을 작성하였다. 작성된 퍼지 규칙은 <표 4>와 같다. 또한, 퍼지 규칙의 작성에서는 지체에 결정적인 영향을 주는 신호 주기 및 녹색신호시간비에 모두 적용 가능한 하나의 일반적인 퍼지 규칙을 도출해 내며, 신호주기 및 녹색신호시간비에 대한 영향은 퍼지 집합을 결정하는 과정에 포함시키도록 하였다.

<표 4>에서 VH, H, M, L, VL은 각각, Very High, High, Median, Low, Very Low이며, Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ는 한산, 정상, 혼잡, 지체, 정체를 나타낸다. 이와 같은 퍼지 규칙에서는 검지기의 검지 오류와 퍼지 집합 설정상에서의 오류로 인한 부분을 보완하기 위해 필수적인 규칙과 보완적인 규칙으로 나누어질 수 있다. <표 4>에서 보완적인 규칙은 음영으로 칠해진 부분이다.

작성된 퍼지 규칙은 FETSVO 모형의 퍼지 규칙과 같이 IF-THEN rule로 해석될 수 있으며, FETSVO 모형과 마찬가지로 지점속도가 높고 또는 점유율이 낮은 경우 교통류 상태는 한산할 것이라는 교통류 현상을 관측함으로써 작성되었다.

3) 퍼지 집합(Fuzzy Sets)

본 모형에서 퍼지 집합 수의 결정은 우선, 지점속도, 점유율과의 관계성을 볼 때 같은 수로 결정되어야 한다고 판단하였다. 이렇게 함으로써 퍼지 규칙이 <표 4>와 같이 단순한 형태로 구성될 수 있다. 여러 가지 퍼지 집합에 대한 실험 결과, 퍼지 집합의 수가 많아지면 상대적으로 통행시간의 퍼지 집합(한산, 정상 등)의 수도 증가하여야 하는데, 위에서 설정한 5개

이상으로 통행시간의 집합을 나눈다는 것은 오히려 명쾌한 해석력을 떨어뜨리는 결과를 초래할 것이라고 판단하였으며, 최종적으로 입출력변수 모두 5개로 결정하였다.

퍼지 집합의 결정은 지체 추정에 있어서 링크의 길이 및 신호 변수에 대한 영향을 고려하여 설정되어야 한다. 퍼지 집합의 결정에서 가장 중요한 것은 퍼지 집합의 범위 설정이다. 지체의 최소값에 관한 문제는 부분은 문제가 되지 않지만, 지체의 최대값의 범위는 본 모형의 추정력에 결정적인 영향을 미치게 된다. 그러나, 링크의 길이가 짧은 경우, 아무리 혼잡하다하더라도 링크가 긴 링크에서의 발생하는 최대 지체보다는 작은 최대 지체값이 관측될 것이라는 것은 자명한 사실이다. 이러한 현상은 신호주기와 녹색신호시간비에 의해서도 동시에 관측된다.

(1) 지체 퍼지 집합 결정

링크 길이에 따른 지체의 영향은 대기행렬의 발생 길이와 밀접한 관련이 있다. 즉, 링크 길이보다 긴 대기행렬은 발생할 수 없으며, 이에 따라 지체의 최대값도 달라지게 된다. 또한 대기행렬 길이의 소거 시간은 지체에 큰 영향을 주며, 대기행렬의 소거 시간은 신호주기와 녹색신호시간비에 따라 달라지게 되므로, 퍼지 집합을 결정하기 위해서는 본 모형의 적용 이전에 지체의 최대값이 계산되어야 한다.

링크 전체가 대기행렬로 차 있다고 가정하였을 때, 진입한 어떤 차량이 하류의 교차로를 통과하기까지 걸리는 시간 d 는

$$d = \frac{3600 \cdot L}{s \cdot (L_v + S)} \quad (6)$$

여기서, L 은 링크의 길이, L_v 는 차량의 평균길이, S 는 평균 차간거리이며, s 는 포화교통류율(VPH)이다. d 는 신호주기를 고려하지 않은 소요시간으로서, 신호주기의 영향을 고려하기 위해서는 계산된 값을 주기당 녹색신호시간을 나누어야 한다.

$$c = \text{interger} \left(\frac{d}{\lambda C} \right) \cdot C + R \quad (7)$$

여기서, c 의 전항은 그 차량이 기다려야 하는 신

〈표 5〉 지체 퍼지 집합

지체의 언어값	좌측값	꼭지점	우측값
한산	0	R/2	C
정상	R/2	C	C+R
혼잡	C	C+R	2C
지체	C+R	2C	2C+R
정체	2C	2C+R	c

호주기의 수를 의미하며, 후항은 차량이 교차로를 통과하기 위해 기다리는 적색시간(R)을 더한 것이다. 여기서, λ 는 녹색신호시간비, C 는 주기 길이이다. c 는 링크에서 발생할 수 있는 최대 지체시간(초)을 의미한다. 그러나, 현실에서 이와 같은 극심한 혼잡이 발생하는 경우 가로 전체가 혼잡하게 되는 경우가 많으며, 이런 경우 하류 교차로에서는 앞 링크의 대기행렬이 자라나 다음 교차로에 영향을 줌에 따라 포화교통류율이 낮아지는 현상이 발생하므로 지체는 더욱 심해지게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 spill-back 현상이 발생할 경우 야기되는 포화교통류율의 감소 및 운전 행태의 변화 등은 고려하지 않는다.

위와 같이 본 모형의 지체 퍼지 집합을 결정하기 위해서는 링크의 신호주기와 녹색신호시간비를 알아야 하며, 구해진 최대 지체값을 이용하여 최종적인 퍼지 집합을 구축하면 〈표 5〉와 같다. 지체의 퍼지 집합은 모든 경우에 대해 단일(unique)하다.

〈표 5〉에서 C 는 신호주기이며, R 은 적색신호시간이다. c 는 계산된 최대 지체값이다. c 값이 정체상태의 꼭지점값보다 작거나 같은 경우에는 정체상태의 꼭지점값을 c 값으로 입력하고 우측값에는 $2C+R$ 을 입력한다.

(2) 점유율 및 지점속도 퍼지 집합 결정

통행시간에 대한 점유율의 값은 검지기의 위치에 따라서 상이하기 때문에, 검지기의 위치에 대한 고려가 필요하다. 여기서는 검지기의 위치가 200m와 400m인 경우만을 대상으로 점유율의 퍼지집합을 제시한다. 삼각함수를 퍼지화기로 사용하는 본 모형의 퍼지 집합은 각각의 퍼지집합이 3개의 값에 의해 정의될 수 있으므로 5개의 퍼지 집합을 정의하기 위해서는 15개의 값이 필요하다. 본 연구에서는 퍼지 집합의 조정을 용이하게 할 수 있도록 5개의 삼각함수의 꼭지점값만을 이용하도록 하였다.

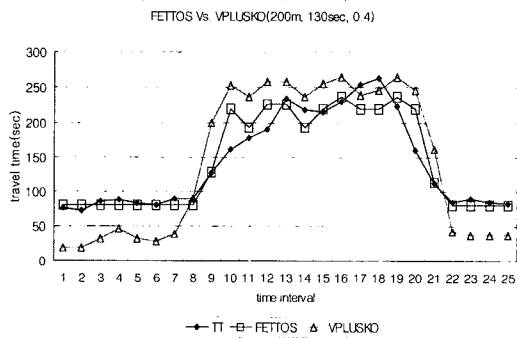
본 모형에서는 퍼지 집합을 결정하는 5개의 값 (각 퍼지 집합의 꼭지점 값)은 DETSIM 모형에 의해 신호주기와 녹색신호시간비에 따라 각각 산출되었다.

4) 적용 결과

본 모형의 평가를 위한 시뮬레이션은 FETSVO 모형과 동일한 자료에 의해 수행되었다.

〈그림 5〉는 검지기가 200m에 위치한 경우, 신호주기 130초, 녹색신호시간비 0.4에 대한 추정 결과이다. 여기서는 VPLUSKO 방법과 비교하였다. 검지기 200m에서 추정한 결과는 VPLUSKO 방법보다 모든 경우에서 우수하며, VPLUSKO는 통행시간을 과대 및 과소 추정하는 경향이 있다. 〈그림 6〉은 검지기가 400m에 위치한 경우의 통행시간 추정 결과이다.

검지기가 400m에 존재하는 경우에도 본 모형에 의한 통행시간 추정결과가 VPLUSKO 방법보다 우수하다. 〈표 6〉에서는 각 결과를 RMSE(Root Mean Square Error)로 비교하였다. 비교 결과는 통행시간에 대한 결과이므로 RMSE의 단위는 초(second)로 이해될 수 있다.



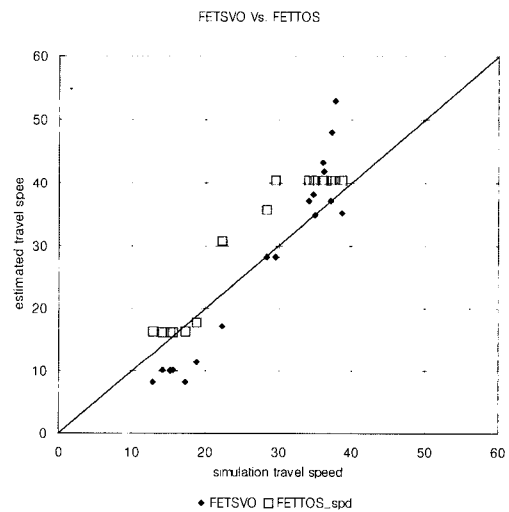
〈그림 5〉 통행시간 추정 결과(주기 130초)

〈표 6〉 FETTS와 VPLUSKO의 비교(RMSE)

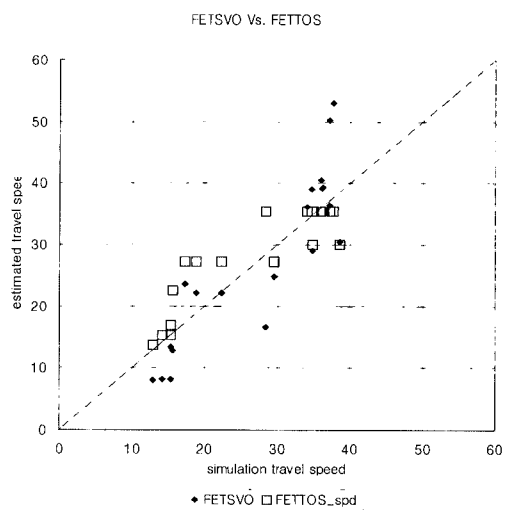
검지기 위치	200m		400m	
	FETTS	VPLUSKO	FETTS	VPLUSKO
100초	11.9	71.9	21.1	52.0
130초	23.8	60.6	17.6	66.6
160초	19.5	56.4	27.4	67.5

3. 각 추정 기법의 비교 평가

FETSVO와 FETTOS의 추정 기법을 비교 평가하기 위하여는 두 모형의 산출물에 대한 단위를 일치시켜야 한다. FETSVO는 통행속도를 추정하기 때문에, 여기서는 FETTOS의 결과를 통행속도로 환산하여 비교하였다. 이와 같이 비교한 것은 통행속도를 추정결과를 환산하여 발생하는 비교상의 불합리를 제거하기 위함이다.



〈그림 6〉 FETSVO와 FETTOS의 산포도 (주기 100초, 검지기 200m)



〈그림 7〉 FETSVO와 FETTOS의 산포도 (주기 100초, 검지기 400m)

〈표 7〉 FETSVO와 FETTOS의 비교(RMSE)

검지기	200m		400m	
	FETSVO	FETTOS	FETSVO	FETTOS
100초	6.3	4.7	6.7	4.6
130초	8.1	2.2	3.1	2.2
160초	9.5	2.4	3.7	4.5

〈그림 6, 7〉은 주기가 100초이며, 검지기 위치가 200m과 400m에서 두 방법을 비교한 결과이다. FETSVO 방법이 통행속도를 과소 및 과대 예측하는 경향을 보이며, FETTOS는 통행속도가 낮아지는 데에 다소 민감하지 않은 것을 알 수 있다. 〈표 8〉은 FETSVO와 FETTOS의 추정 결과를 통행속도에 대한 RMSE로 비교한 결과이다. 각 값들은 속도 단위이다.

〈표 7〉에서 FETTOS가 FETSVO보다 우수한 추정을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, FETSVO 모형은 신호시간 및 검지기 위치 정보를 필요로 하는 FETTOS와는 달리 링크 및 신호시간에 대한 정보 없이 추정한 결과라는 것을 고려할 때 우수한 추정력을 가진다고 할 수 있다. 여기서 나타난 FETTOS의 추정력이 〈표 6〉과 상이한 것은 FETTOS 모형의 출력결과를 FETSVO 모형과 비교하기 위해 통행속도로 환산하여 나타난 스케일상의 문제이다. 〈표 6〉에서 신호주기가 100초인 경우에는 200m의 FETTOS의 결과가 더 우수한 것으로 나타난 반면, 통행시간으로 환산한 〈표 7〉에서는 400m에서 우수한 추정력을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 통행속도가 혼잡한 교통상태에 대한 민감도가 떨어지기 때문에 나타난 현상이며, 통행속도만에 의한 단순한 추정 결과의 비교는 최단경로 제공 등의 측면에서 볼 때, 잘못된 결과를 유도할 수도 있다는 것을 보인다.

VI. 결론

본 연구에서는 단속류에서 링크의 통행시간을 추정하는 기존의 방법을 검토하고 퍼지논리제어기를 응용한 2개의 모형을 제시하였다.

일반적으로 퍼지 제어기(Fuzzy Logic Controller)는 전문가의 지식을 이용하여 작성된 어떤 Knowledge Base에 의해 입출력의 관계를 쉽게 정의할 수 있고 인공지능 기법중 이해가 용이하다는 장점은 있으나, 퍼지제어기의 성능에 결정적인 역할을 하는 퍼지집합

의 수와 설정방법은 적용되는 분야마다 경험적인 방법에 의해 결정되어야 하므로 적용이 쉽지 않으며 퍼지집합을 설정하기 위해서는 많은 현장자료를 필요로 한다.

FETSVO 모형은 기존 모형이 제시하지 못한 퍼지 집합과 퍼지규칙에 대한 설정방법을 제시하고 적용성의 한계를 극복하였으며, 단일의 퍼지 규칙과 입력 자료에 의한 퍼지 집합 설정 방식을 적용하여 퍼지 집합의 수정이 용이하고 이식성이 뛰어나며, 퍼지집합 설정시 입력 자료이외의 어떠한 정보도 필요로 하지 않는다. 즉, 입력자료의 특성으로부터 검지기의 위치와 신호주기 등 해당링크의 교통 및 도로조건이 반영되어 있다고 가정한다. FETSVO 모형은 교통정보를 제공하기 위해 불충분한 정보만이 이용가능할 때 적합한 모형이라고 판단된다.

FETTOS 모형은 교통량이 가지는 통행시간과의 비선형성을 고려하여 교통량을 제외하고 지점속도와 점유율을 이용하여 좀더 단순한 퍼지규칙을 작성하였다. FETTOS 모형은 검지기의 위치가 교통상황에 민감한 위치(정지선에서 200~400m)에 있다는 가정을 가지고 있으며, 지점속도와 점유율이 통행시간과 가지는 선형관계를 단일 퍼지 규칙으로 작성하였으며, 단일 통행시간 집합을 사용한다. 모형을 적용하기 위해서는 신호시간계획과 검지기 위치에 대한 정보가 필요하며, 이러한 정보가 주어지면 FETSVO 모형보다 통행시간 추정력이 우수하다. FETTOS 모형은 새로이 구축하는 시스템과 같이 검지기의 위치를 조정가능하고, 도로환경에 대한 정보가 충분한 경우에 적합할 것이다.

또한, 본 연구에서 제시하는 두 모형은 퍼지제어기를 사용하기 때문에 원활한 교통류와 혼잡 교통류에 대해서, 그리고 단속류에서 다양하게 발생하는 수집 변수에 대해 완벽한 이해가 없다 하더라도 높은 수준의 추정 능력을 보인다. 그리고, 검지장비의 수집 오류 등으로 인하여 입력자료의 일부가 오류를 가진다 하더라도 최종적인 출력은 퍼지추론을 통하여 입력된 자료 중 가장 신뢰할 수 있는 부분에 의해 결정되므로, 현재의 검지 수준과 현실적인 제약 등을 고려할 때 단속류에서 적절한 추정 기법이라고 할 수 있다.

향후 연구에서는 본 모형에 적응력이 있는 학습 능력(Adaptive Learning)을 가지는 개선된 형태의 인공지능 기법이 도입되어 수집가능한 통행시간의 참값

(probe vehicle 등이 운영될 때)이 존재하면 모형의 성능이 자동적으로 향상되도록 발전되어야 할 것이다. 최근에는 퍼지제어기의 의사결정 능력과 신경망의 학습 능력을 결합한 다양한 형태의 모형이 개발되고 있으므로 이에 대한 관심이 요구된다 하겠다.

참고문헌

1. Robert L. Gordon et al(1996), Traffic Control Systems Handbook, FHWA-SA-95-032.
2. 김영찬·최기주·오기도·김도경(1997), "단일루프검지기를 이용한 간선도로 실시간 통행속도 추정 방법론", 대한교통학회지, 제15권 제4호, 1997. 12, 대한교통학회.
3. Stanislaw Berka, Helen Condie and Aaron Sheffey(1996), "ADVANCE Evaluation Detector Travel Time Conversion and Fusion of Probe and Detector Data", University of Illinois at Chicago.
4. Virginia P. Sisiopiku, Prasad Palacharla and Peter C. Nelson(1994), "Fuzzy Reasoning Model for Converting Loop Detector Data into Travel Times", University of Illinois at Chicago, ADVANCE Working Paper Series No. 38.
5. 김도경(1998), "루프검지기를 이용한 도시간선도로의 실시간 통행속도 추정 방법론", 서울시립대학교 석사학위 논문.
6. Chin-Teng Lin and C. S. George Lee(1996), Neural Fuzzy Systems A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems, Prentice Hall, U.S.A.
7. 채석·오영석(1997), 퍼지이론과 제어, 청문각.

✉ 주 작 성 자 : 오기도
 ✉ 논문투고일 : 2000. 6. 2
 논문심사일 : 2000. 6. 22 (1차)
 2000. 7. 21 (2차)
 2000. 8. 2 (3차)
 심사완료일 : 2000. 8. 2